

This is the design of religious buildings undertaken in the reality of the Italian provinces, in the years immediately after the war. Here the architect is called upon to deal with a low budget, which necessarily determines the use of unsophisticated materials and construction techniques and a certain simplicity in the decorative scheme. However, Zander demonstrates a praiseworthy capacity for aiming to reach an artistic value, based on simplified expressions of the contemporary, ascribable to the architectural traditions of the past that he knew so well. Thus, this is a "modern" architecture, essential in its forms, in which the memory of local architectural tradition can be perceived "between the lines", albeit revised in new forms and using "modern" materials and techniques.

REFERENCES

- [1] G. Carbonara, *Avvicinamento al restauro. Teoria, storia, monumenti*. Napoli: Liguori publisher, 1997 [2010].
- [2] C. Ceschi, *Teoria e storia del restauro*, Roma: Bulzoni publisher, 1970.
- [3] *Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites*, Venice 1964.
- [4] C. Frigieri, "Giuseppe Zander. Dottrina e operatività nello studio e nel restauro," Ph.D. dissertation, Department of History, Representation and Restoration of Architecture, Sapienza University of Rome, 2018.

- [5] G. Zander, "Il campanile di S. Pietro in Vincoli presso Ravenna e la sua ricostruzione," *Palladio*, n. II, pp. 80-82, January-June, 1962.
- [6] P. Gazzola, *Il Ponte di Castelvechio a Verona*. Verona: Valdonega publisher, 1951.
- [7] Archivio Segreto Vaticano (ASV). Fondo Commissione Centrale Arte Sacra in Italia, Archivio Generale, b. 113, fasc. 49.
- [8] G. Zander, "L'applicazione dei materiali moderni nel restauro perché il cemento," in *Restauro e cemento in architettura*, G. Carbonara, Roma: AITEC, 1988, vol. II, pp. 68-77.
- [9] G. Miarelli Mariani, "Una "passeggiata" intorno al mondo di Giuseppe," in *Giuseppe Zander architetto*, R. Luciani, M. Zander, P. Zander, Roma: Fratelli Palombi publisher, 1997.
- [10] Archivio Segreto Vaticano (ASV). Fondo Commissione Centrale Arte Sacra in Italia, Capo I, b. 831, fasc. 2.



USE OF EXPANSIVE AGENTS TO INCREASE THE SUSTAINABILITY OF PRE-CAST CONCRETES

José Luis GARCÍA CALVO

Dr. Ciencias Ambientales. IETcc-CSIC. jolgac@ietcc.csic.es

Pedro CARBALLOSA

Dr. Ingeniero de Materiales. IETcc-CSIC. carballosa@ietcc.csic.es

Filipe PEDROSA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. filipe.pedrosa@csic.es

David REVUELTA

Dr. Ingeniero Industrial. IETcc-CSIC. d.revuelta@ietcc.csic.es

Alejandro CANAL

Ingeniero de Minas. UPM. acanal@gmail.com

ABSTRACT

Heat curing processes are often used to ensure the production rate of precast concrete elements as this process increases the early strength of the material. However, the increase in curing temperature influences the final mechanical properties negatively since cracking and mainly high porosity take place in that conditions. In order to compensate the expected mechanical and durability-related properties loss, the cement content must be increased. This solution increases the cost of the final product and decreases its sustainability. Thus, in this study the development of expansive self-compacting concretes is proposed to achieve higher final mechanical properties without using higher cement contents. The obtained results show that it is even possible to obtain similar final compressive strength values in expansive concretes cured at high temperature than in those cured in standard conditions.

RESUMEN

El curado a elevada temperatura se emplea para garantizar los ritmos de producción en la industria de prefabricados de hormigón dado que aumenta las resistencias mecánicas iniciales del material. Sin embargo, el aumento de la temperatura de curado genera una disminución de las propiedades mecánicas finales dado que promueve la aparición de fisuras y, sobre todo, la formación de



mayor porosidad. Para compensar esta pérdida final de propiedades mecánicas y durables, se suele aumentar el contenido de cemento, aumentando el coste del producto final y disminuyendo la sostenibilidad del proceso productivo. Por ello, este estudio propone el desarrollo de hormigones autocompactantes expansivos que permitan la obtención de propiedades mecánicas finales superiores al aumentar el contenido en cemento del hormigón. Los resultados obtenidos demuestran que las resistencias a compresión finales de estos hormigones expansivos curados a elevada temperatura pueden ser similares a las de los mismos hormigones curados en condiciones estándar.

Palabras clave: *hormigón prefabricado, curado acelerado, hormigón expansivo, hormigón autocompactante, propiedades mecánicas, microestructura, sostenibilidad.*

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos de hormigón prefabricado, a diferencia del hormigón preparado en central, que se transporta en estado fresco hasta la obra donde va a ser utilizado, se moldean, compactan y curan en la misma instalación hasta obtener el elemento final endurecido, dando por tanto como resultado un producto más industrializado, con una mayor uniformidad del material fabricado y con un coste más reducido [1]. Muchas plantas de prefabricación utilizan un curado acelerado a elevada temperatura para garantizar los ritmos de producción requeridos en las estructuras de hormigón prefabricado, dado que este tipo de curado aumenta significativamente las resistencias tempranas del hormigón. Sin embargo, este aumento de la temperatura de curado disminuye las propiedades mecánicas finales del material con respecto a un curado convencional [2, 3], hándicap que debe ser considerado durante el proceso de diseño del hormigón base empleado para cumplir con los requisitos finales y la elevada calidad demandada.

El problema reside en que la rápida hidratación inicial que sufre el material genera una estructura física menos robusta, debido al escaso e insuficiente tiempo disponible para que los productos de hidratación precipiten de un modo equitativo en los espacios intersticiales. De este modo se genera una mayor porosidad en el material, o una distinta distribución del tamaño de poros (incrementando generalmente el número de poros de mayor tamaño), que afecta negativamente a las resistencias mecánicas finales [3,4]. Pero además de este aumento de la porosidad, en los elementos de hormigón prefabricados también se generan fisuras durante el curado acelerado o en la fase de enfriamiento. Es evidente que a ello contribuye la existencia de gradientes de temperatura durante el curado entre unas zonas y otras de la pieza, generando tensiones. El origen de parte de esta microfisuración se asocia a procesos de retracción, por un lado por autosecado del hormigón, pero también posiblemente como consecuencia de gradientes de temperatura durante el curado que generan tensiones internas y también

durante el proceso de enfriamiento, a lo que contribuye la propia geometría de la pieza prefabricada. En este sentido, los gradientes internos de temperatura en la masa de hormigón pueden dar lugar a tensiones de fraguado diferentes que lleven a generar tensiones dentro de la pieza y que pueden afectar a la aparición de fisuración en la pieza durante el propio proceso de curado acelerado. Además, también se detectan microfisuras en los hormigones sometidos a curado acelerado a elevada temperatura, localizadas junto a los áridos y perpendiculares a las interfaces pasta/pasta, fenómeno conocido como "crack-arresting factor". Este aumento de la porosidad y de la fisuración dentro del hormigón, además de la bajada de resistencias mecánicas, genera aumentos de permeabilidad en el hormigón, disminuyendo, por tanto, su resistencia frente a la penetración de agentes agresivos [5,6]. De hecho, se ha observado que las propiedades a muy largo plazo del hormigón también se ven afectadas por este curado inicial a elevada temperatura [5].

Para reducir esta pérdida de propiedades, lo que se hace es aumentar considerablemente el contenido en cemento del hormigón, de modo que las resistencias mecánicas finales obtenidas se enmarquen dentro de los requisitos del fabricante, a pesar de la pérdida de propiedades generadas. Lógicamente, este aumento en contenido de cemento se aleja de la búsqueda de sostenibilidad medioambiental dentro del proceso industrial. Sin embargo, el sector de la construcción debe asumir el desafío de compatibilizar su actividad industrial y la protección medioambiental, y la solución pasa inevitablemente por potenciar la

elaboración de hormigones con menor contenido en cemento, ya sea empleando adiciones minerales, aditivos químicos, etc.

En el presente estudio se muestra un estudio preliminar, desarrollado en el marco del proyecto SINNFISURA (BIA2015-64363-R), en el que se han incorporado agentes expansivos en hormigones autocompactantes sometidos a curado acelerado a elevada temperatura. Los agentes expansivos son materiales que, durante el periodo de hidratación del hormigón, se hidratan expandiéndose ellos mismos o bien reaccionan con otros constituyentes del cemento para causar dicha expansión. Hasta la fecha se han venido empleando fundamentalmente para compensar la pérdida de volumen que experimenta el hormigón cuando seca y, más recientemente y en combinación con camisas de acero, como medio para pretensar químicamente el hormigón, aumentando la capacidad resistente. Se han considerado dos tipos de agentes expansivos: tipo K, que promueven la formación de etringita, y tipo G, que generan portlandita. Es importante destacar el hecho de que ambos agentes expansivos van a promover las deformaciones positivas en el hormigón a partir de la generación de hidratos que son productos típicos de hidratación de los materiales basados en OPC. Con su empleo en este estudio se pretende que, a medida que se van hidratando, rellenen los poros y fisuras que aparezcan en los elementos prefabricados tanto durante el proceso de curado acelerado como durante la etapa inicial de enfriamiento. Se sabe que los agentes expansivos actúan durante las primeras etapas de la hidratación, por lo que se espera que sus



propiedades sean idóneas para este tipo de problemática. En el estudio mostrado en este trabajo, se han considerado dos tipos de hormigones autocompactantes expansivos (HACEs), en los que el contenido de finos se aumentó empleando filler calizo o cenizas volantes. Se ha analizado la influencia del curado acelerado en las propiedades de los HACEs, comparándolas con las obtenidas en HACs no expansivos de similar composición.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este trabajo se han estudiado 6 dosificaciones de hormigones, expuestas en la Tabla 1. Todos los hormigones se fabricaron con contenidos de cemento y relación agua/cemento (a/c) idénticos. La cantidad de agente expansivo empleado fue del 10% en peso de cemento.

Las propiedades de los hormigones en el estado fresco se caracterizaron midiendo la consistencia o el escurrimiento y la capacidad de paso a través del anillo japonés, la densidad y el contenido en aire. En cada uno de los casos se llevaron a cabo dos tipos de curado: curado acelerado empleando una temperatura máxima de 60°C y curado convencional en cámara húmeda a 20°C. Se fabricaron probetas cilíndricas de 100x200 mm para analizar la resistencia a compresión a 7 y 28 días. Además, se fabricaron probetas prismáticas de dimensiones 254x76x76mm para la determinación de la expansión uniaxial restringida. En este caso, las probetas no sometidas a curado acelerado, siguieron dos condiciones de exposición distintas: cámara húmeda a 20°C y envueltas en

film a 20°C y a 50%HR. Todas las probetas curadas aceleradamente estuvieron expuestas a 20°C y 50%HR hasta la edad de ensayo.

Tabla 1: Dosificaciones de hormigón empleadas.

Kg/m ³	R-F	EF-K/ ECV-K	R-CV	EF-G/ ECV-G
Cemento	385	385	385	385
Agua	195	195	195	195
Filler/CV	115	115	115	115
Arena (0-4mm)	981	961	962	942
Grava (4-12mm)	695	681	681	668
Agente expansivo	-	38,5	-	38,5
SP	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%

3. RESULTADOS

3.1. Estado fresco

El valor del escurrimiento de todos los hormigones fabricados se encuentra en el rango de hormigón autocompactante. Todas las tortas de hormigón analizadas tienen diámetros similares, dentro de la categoría SF2. Por ello, se puede indicar que la adición de agentes expansivos no modifica, de forma reseñable, la condición de autocompactante de los hormigones empleados como referencia.

De cualquier modo, la adición de agente expansivo tipo K parece disminuir ligeramente el valor del escurrimiento, mientras que el agente tipo G presenta valores similares o ligeramente superiores al hormigón de referencia.

Las dosificaciones estudiadas presentan un valor de densidad muy similar, en torno a 2,3 g/cm³. En cuanto al contenido en aire, si bien todos los valores obtenidos son bastante similares (en torno al 3%), parece que las mezclas con agente expansivo tipo G, presentan un contenido en aire ligeramente superior.

A grandes rasgos se puede concluir que la adición de los agentes expansivos, en las proporciones empleadas en este estudio, no modifican las propiedades del estado fresco de los hormigones autocompactantes, lo que concuerda con resultados obtenidos en publicaciones anteriores [7,8].

3.2. Propiedades mecánicas.

La Figura 1 muestra el valor medio de resistencia a compresión tras 2 y 28 días de curado en las seis mezclas de hormigón con ambos tipos de curado, acelerado y húmedo. La adición de agentes expansivos aumenta la resistencia a compresión sobre los hormigones referencia, en las dos edades de curado analizadas. Esto es lógico debido al mayor contenido en material cementante que poseen. Sin embargo, también se pueden realizar otras importantes conclusiones. Comparando la resistencia a compresión con curado normal de cada hormigón con la obtenida tras el proceso de curado acelerado, se detecta que al emplear el agente

expansivo la diferencia entre ambas es menor.

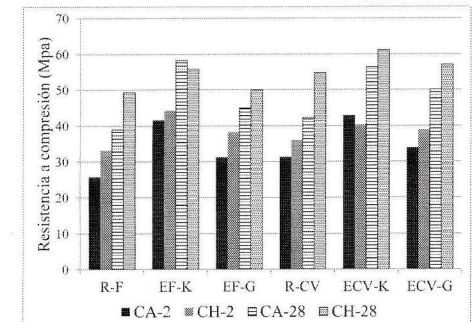


Figura 1: Resistencia a compresión de los hormigones evaluados tras 2 y 28 días. CA: curado acelerado; CH: curado húmedo.

En este sentido, la Tabla 2 muestra el porcentaje que supone la resistencia obtenida tras curado acelerado, respecto a la obtenida con curado convencional tras 2 y 28 días de estudio. Es evidente que la caída de resistencias que genera el curado acelerado es menor en el caso de emplear los hormigones autocompactantes expansivos en todos los casos evaluados. Además, la adición de agente tipo K es la que promueve un menor descenso tras el curado acelerado, llegando incluso a superar la resistencia a compresión obtenida tras dos días de curado convencional en el caso de emplear el HACE con filler calizo en su composición.

Por lo tanto, parece que la adición de agentes expansivos efectivamente limita la pérdida de propiedades mecánicas generadas por la exposición del hormigón a un curado acelerado a elevada temperatura.



Tabla 2: Relación entre la resistencia a compresión con curado acelerado y la obtenida con curado húmedo tras 2 y 28 días de curado (%).

	2 días	28 días
R-F	77,8	79,1
EF-K	94,1	104,3
EF-G	81,7	89,8
R-CV	86,8	77,2
ECV-K	106,4	92,1
ECV-G	87,1	87,8

3.3. Comportamiento expansivo.

El comportamiento expansivo de los hormigones evaluados se presenta en las Figuras 2 a 4. Como ejemplo, se muestran los resultados obtenidos en los hormigones autocompactantes fabricados con filler calizo, si bien los registrados en los hormigones con cenizas volantes son similares.

Lo más destacable observando el comportamiento expansivo de los hormigones fabricados es el hecho de que, mientras en los HAC no expansivos el curado acelerado promueve un valor de retracción por secado final muy superior a la detectada en las mismas probetas envueltas en film, en el caso de los HACEs, la retracción final obtenida con el curado acelerado es muy similar a la medida en las probetas envueltas en film. Esto se explica, por un lado, porque el valor máximo de expansión inicial obtenida tras el curado acelerado es

superior que en las probetas envueltas en film. Por otro lado, también se explica por el hecho de que el curado acelerado afecte de un menor modo a las propiedades de los hormigones expansivos que a las de los hormigones no expansivos. Esta limitación de la retracción por secado debe ir asociada a una mejora de las propiedades durables de los hormigones obtenidos, limitando la aparición posterior de fisuras.

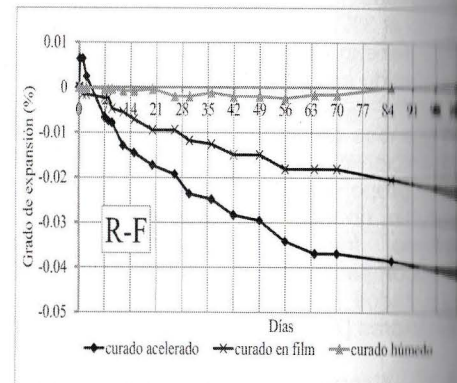


Figura 2: Comportamiento expansivo de los hormigones R-F.

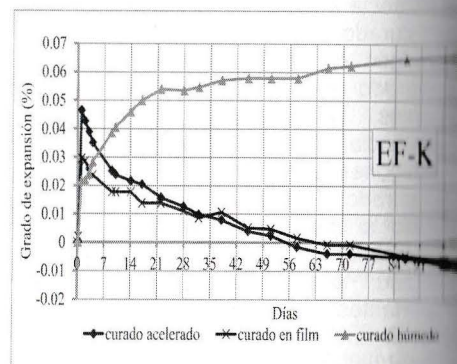


Figura 3: Comportamiento expansivo de los hormigones EF-K.

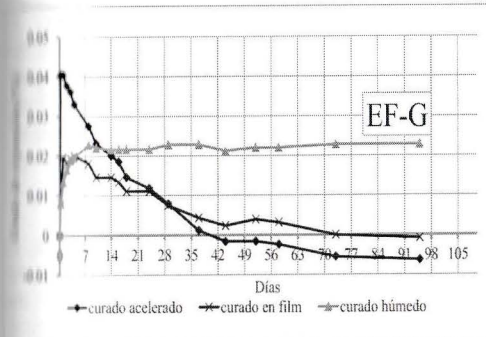


Figura 4: Comportamiento expansivo de los hormigones EF-G.

En relación a la expansión obtenida con curado acelerado, al emplear agente expansivo tipo K, la menor retracción remanente se produce al emplear filler calizo, lo que concuerda con su mayor resistencia mecánica con respecto a la mezcla con cenizas volantes. En el caso de utilizar agente expansivo tipo G ocurre lo contrario, siendo el hormigón con cenizas volantes el que tras el curado acelerado presenta mayor expansión remanente y mayor resistencia a compresión.

4. CONCLUSIONES

El estudio llevado a cabo permite concluir que el empleo de hormigones expansivos en procesos de curado acelerado promueve la obtención de hormigones de mayor calidad. En cuanto a las conclusiones específicas, se pueden destacar las siguientes:

- La adición de agentes expansivos tipo K y tipo G, en las proporciones empleadas en este estudio, permite el desarrollo de hormigones autocompactantes y

no modifican significativamente las propiedades del estado fresco obtenidas en hormigones autocompactantes no expansivos.

- La adición de agentes expansivos y el mayor contenido de material cementante aumenta la resistencia a compresión sobre los hormigones referencia, en las dos edades de curado analizadas. Además, la adición de agentes expansivos a los HACs referencia minora la incidencia del régimen de curado y limita la pérdida de propiedades mecánicas ocasionada por los procesos de curado acelerado respecto a las observadas en los hormigones referencia
- El empleo de agentes expansivos limita la retracción por secado obtenida tras los procesos de curado acelerado, obteniéndose valores muy similares a los medidos en las probetas envueltas en film, es decir, sin intercambio de humedad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad la financiación recibida para la realización de este trabajo dentro del proyecto BIA2015-64363-R. Además, agradecen a Alfredo Fernández-Escandón y Juan Carlos Porras su colaboración durante el desarrollo de la experimentación realizada.

REFERENCIAS

- [1] D.W.S. Ho, C.W. Chua y C.T. Tam, "Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures", *Cem Concr Res*, vol. 33, pp. 595-601, 2003
- [2] I.B. Topçu y M.U. Toprak, "Fine aggregate and curing temperature effect on concrete maturity", *Cem Concr Res*, vol. 35, pp. 758-762, 2005
- [3] J.L. García Calvo, M.C. Alonso, L. Fernández Luco y M. Robles, "Durability performance of sustainable self compacting concretes in precast products due to heat curing", *Constr Build Mater*, vol. 111, pp. 379-385, 2016
- [4] H-W. Reinhardt y M. Stegmaier, "Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of SCC", *Cem Concr Res*, vol. 36, pp. 879-885, 2006
- [5] R.J. Detwiler, C.A. Fapohunda y J. Natale, "Use of supplementary cementing materials to increase the resistance to chloride ion penetration of concretes cured at elevated temperatures", *ACI Mater J*, vol. 91, pp. 63-66, 1994
- [6] I. Elkhadiri y F. Puertas, "The effect of curing temperature on sulphate-resistant cement hydration and strength", *Constr Build Mater*, vo. 22, pp. 1331-1341, 2008
- [7] P. Carballosa, J.L. García Calvo, D. Revuelta, J.J. Sánchez y J.P. and Gutiérrez, "Influence of cement and expansive additive types in the performance of self stressing and self-compacting concretes for structural elements", *Constr Build Mater*, vol. 93, pp. 223-229, 2015
- [8] J.L. García Calvo, D. Revuelta, P. Carballosa y J.P. and Gutiérrez, "Comparison between the performance of expansive SCC and expansive conventional concretes in different expansion and curing conditions", *Constr Build Mater*, vol. 136, pp. 277-285, 2015



ECO-FRIENDLY HEALING AGENTS FOR RECYCLED CONCRETE

Julia GARCÍA-GONZÁLEZ

PhD. Researcher. Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, University of Leon.
julia.garcia@unileon.es

André FRECHES

Researcher. LAQV-REQUIMTE, Dep. of Chemistry, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. a.freches@campus.fct.unl.pt

Paulo C. LEMOS

Principal Investigator. LAQV-REQUIMTE, Dep. of Chemistry, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. paulo.lemos@fct.unl.pt

Alice S. PEREIRA

Professor. UCIBIO-REQUIMTE, Dep. of Chemistry, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. masp@fct.unl.pt

Andrés JUAN-VALDÉS

Professor. Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, University of Leon.
andres.juan@unileon.es

Julia M^a. MORÁN-DEL POZO

Professor. Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, University of Leon.
julia.moran@unileon.es

M. Ignacio GUERRA-ROMERO

Professor. Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, University of Leon.
ignacio.guerra@unileon.es

Paulina FARIA

Professor. CERIS and Dep. Civil Engineering, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. mpr@fct.unl.pt